

CSP 连轧过程金属变形的热力耦合模拟分析

李传瑞

(安徽工程科技学院, 芜湖 241000)

王宝峰 麻永林

(内蒙古科技大学, 包头 014010)

摘要 借助 Marc 商用软件, 采用弹塑性大变形热力耦合有限元法(FEM), 对包钢生产的 1 500 mm × 68 mm 薄板坯 CSP(紧凑式带材生产)轧制第一道次的热轧过程进行了模拟。分析了变形区内轧材等效应力场、应变场及应变速率的分布和变化规律。结果表明在轧件变形区内, 等效应力沿轧制方向逐渐增大, 在中性面附近达到最大值(95.20 MPa), 后又逐渐减少; 等效应变亦沿轧制方向逐渐增大, 在轧件出口处达到最大值(0.70); 在轧件入口端表面附近等效应变速率有最大值, 为 20.74 s⁻¹。模拟计算的轧制力为 22 203 kN, 现场测得的轧制力为 22 239 kN, 预测误差为 0.16%。

关键词 CSP 薄板坯热轧 热力耦合 有限元法 模拟分析

An Analysis on Coupled Thermal-Mechanical Simulation of Metal Deformation in Continuous Rolling of Compact Strip Production

Li Chuanrui

(Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000)

Wang Baofeng and Ma Yonglin

(Inner Mongolia University of Technology and Science, Baotou 014010)

Abstract The first pass hot rolling process of compact strip production of 1 500 mm × 68 mm thin slab at Baotou Iron and Steel has been simulated by Marc commercial software with the aid of elastic-plastic thermal-mechanical coupled finite element method (FEM). And the distribution and change of equivalent stress field, strain field and strain rate of rolling stock deforming region were analyzed. The results showed that in rolling stock deforming zone the equivalent stress gradually increased along the direction of rolling and came to maximum value (95.20 MPa) nearby neutral face, then gradually decreased; the equivalent strain also gradually increased along the direction of rolling and came to maximum value (0.70) at outlet of workpiece; and the equivalent strain rate had a maximum value nearby surface at inlet of workpiece that was 20.74 s⁻¹. The rolling force simulation-calculated was 22 203 kN, which measured at situ was 22 239 kN, so the prediction error was 0.16%.

Material Index CSP, Thin Slab Hot Rolling, Thermal-Mechanical Coupling, FEM, Simulation Analysis

紧凑式带材生产(CSP)技术是采用漏斗型结晶器、立弯式连铸机、辊底式隧道均热炉以及 5~6 架轧机生产热轧板卷的新的短流程工艺。

本实验建立大变形弹塑性有限元模型, 采用热力耦合分析技术, 分析了薄板坯热轧变形过程, 为工业生产和轧件力学性能的分析提供参考。

1 现场轧制条件及有限元计算模型

1.1 现场轧制条件

本实验模拟的数据是从包钢薄板连铸连轧厂现场测得。薄板坯宽度为 1 500 mm, 厚度为 68 mm; 成品宽度为 1 518 mm, 厚度为 9.5 mm。为了节省计算时间, 根据轧件变形区的长度, 来料长度取为 340 mm。材质为普碳钢 Q 235, 其化学成分

(%) 为: 0.19 ~ 0.20C, 0.38Mn, 0.17Si, 0.02P, 0.005S。轧制工艺参数如表 1 所示。

表 1 模拟过程中的轧制工艺参数

Table 1 Parameters of rolling process in simulation process

轧辊直径 /mm	轧辊转速 /r·s ⁻¹	压下率 /%	开轧温度 /°C	轧辊温度 /°C	环境温度 /°C
732	1.386	38.23	1 015	150	20

模拟过程中把轧辊视为恒温刚性体。考虑对称性, 取 1/2 厚度轧件进行分析。

1.2 有限元计算模型

借助 Marc 商用软件, 采用更新的 Langrange 法描述的大变形弹塑性有限元模型(图 1)。材料的屈服准则采用 Von Mises 准则, 流动准则采用

Prandtl/Reuss 法则。由于轧制前料宽厚比较大,其变形过程为平面变形问题,因此用四边形单元离散 1/2 轧件,单元边长为 3.4 mm,轧件长度方向上取 100 个单元,厚度方向上取 10 个单元,单元总数为 1 000 个。

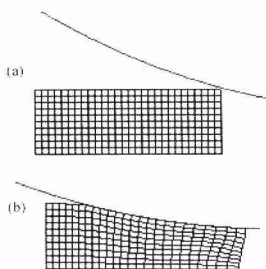


图 1 变形前(a)和变形后(b)的有限元模型
Fig.1 Finite Model for before (a) and after (b) deforming

2 边界条件

轧件对称面上所有节点的位移 u_x 为零。

轧件与轧辊接触面上采用剪切摩擦规律:

$$\sigma_{\tau} \leq -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} t \quad (1)$$

式中: σ_{τ} —切向摩擦应力; m —摩擦因子; $\bar{\sigma}$ —等效切应力; t —切向单位矢量。

接触传热数学表达式为:

$$q_1 = -\lambda (\partial T / \partial y) = \alpha (T - T_g) \quad (2)$$

式中: q_1 —热流密度; λ —热传导系数; α —换热系数;

T —轧件表面温度; T_g —轧辊温度。计算中 α 取 $11 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{-1}$ 。

对流和辐射换热数学表达式为:

$$q_2 = (h + h_r)(T - T_g) \quad (3)$$

式中: h —对流换热系数; h_r —辐射换热系数; T —轧件表面温度; T_g —周围环境温度。计算中 h 取为 $20 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{[1]}$ 。 h_r 可根据辐射定律写成:

$$h_r = \sigma \epsilon (T - T_g)(T^2 + T_g^2) \quad (4)$$

式中: σ —波尔兹曼常数; ϵ —材料热辐射率。

轧件由于变形以及轧件与轧辊间的接触摩擦会产生变形热,转化系数取为 0.9^[2]。接触产生的热量平均分配到轧件和轧辊上。

轧件对称面上采用绝热边界来处理。

轧制过程中,轧件处于第 1、第 2 两个道次机架间部分,要受到前张力的作用。考虑轧件实际变形情况,当轧件在稳定轧制状态时,将前张力添加到轧件中。据现场测量,前张力为 $3 \text{ N}/\text{mm}^2$ 。

材料的热物理性能参数和变形抗力模型取自 Marc 材料库,按照上述初始条件和边界条件,模拟计算轧件的热变形过程。

3 模拟结果的分析与讨论

3.1 轧制变形过程的等效应力场

从图 2(a)看出:从轧件入口开始,沿轧制方向,等效应力逐渐增大,在中性面附近达到最大值(约为 95.20 MPa);然后沿轧制方向,又逐渐降低。

3.2 轧制变形过程的等效应变速率场

图 2(b)是轧件变形区纵截面等效应变速率

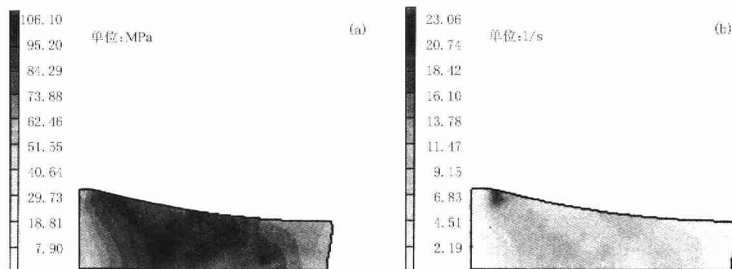


图 2 变形区内轧件等效应力(a)和等效应变速率(b)分布
Fig.2 Distribution of equivalent stress (a) and equivalent strain rate (b) in deforming zone of workpiece

等值云图。可以看出,其变化趋势与等效应力大致相同:沿轧制方向,等效应变速率逐渐增大,达到最大值后又逐渐降低。在轧件入口端表面附近等效应变速率最大,最大值为 20.74 s^{-1} ;而心部等效应变速率在接近中性面时数值较大,约为 13.78 s^{-1} 。

还可看出,在轧件入口和出口附近,应变速率在表面与心部有明显差异,由此在轧件表面和心部将导致材料产生不同程度的硬化。

3.3 轧制变形过程的等效应变场

分析轧件在轧制过程等效应变的变化和分布,是以轧件中心的横断面为研究对象。在该截面上,选取 3 个部位的节点:轧件与轧辊接触表面的节点;离轧件与轧辊接触表面 1/4 厚度的节点;离轧件与轧辊接触表面 1/2 厚度的节点。

从图 3 可以看出,当时间为 0.6 s 时,轧件中心的横断面开始咬入轧机。从整个变形过程来看,该断面上 3 个节点的等效应变变化趋势大致相同:先是逐渐增大,最终达到最大值,然后离开轧机。所不同的是,开始轧制时,表面节点的等效应变值较大,而 1/2 厚度节点的等效应变值最小;随着轧制时间的进行,二者数值差距越来越大,在 0.72 s 左右相差最大;然后随着轧制过程的进行,差距逐渐减少。到离开轧机时,表面节点等效应变值最大,为 0.609 ;1/4 厚度节点等效应变为 0.587 ;而 1/2 厚度节点的等效应变最小,为 0.567 。

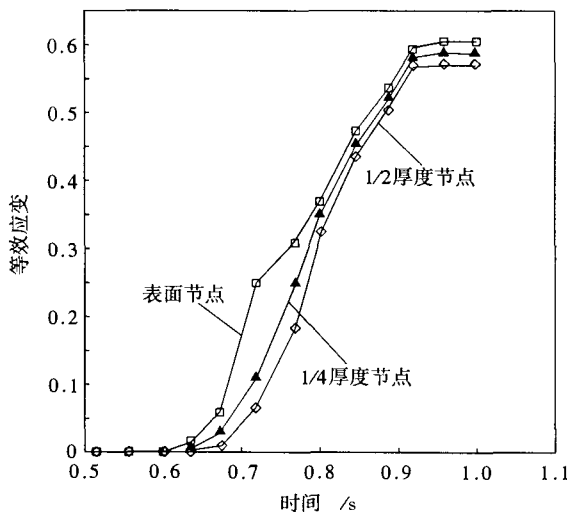


图 3 轧件沿厚度方向节点的等效应变随时间变化曲线

Fig.3 Change curves of node equivalent stress along direction of workpiece depth vs time

以上分析可见,同一断面上从表面接触区域到中心区域的等效应变值由大变小。这种应变分布状况有利于轧件接近表面区域的组织细化。

图 4 是轧件变形区纵截面等效应变场等值线图。可以看出,从轧件入口到轧件出口,沿轧制方向等效应变逐渐增大,最大值为 0.70 。

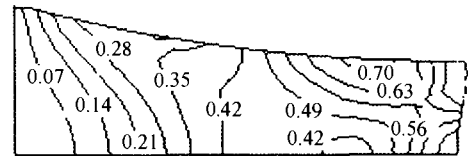


图 4 变形区内轧件等效应变等值线分布

Fig.4 Distribution of equivalent strain curves in deforming zone of workpiece

3.4 轧制过程的轧制力

根据现场实测的数据,模拟计算轧制力为 $22\ 203 \text{ kN}$;而现场轧机记录轧制力为 $22\ 239 \text{ kN}$,预测的误差为 0.16% 。

4 结论

(1) 轧件变形区内沿轧制方向,等效应力逐渐增大,中性面附近达到最大值后又逐渐减少。

(2) 轧件变形区沿轧制方向,等效应变是逐渐增大,在轧件出口处达到最大值。轧件表层的应变值大于心部,有利于轧件表面组织细化。

(3) 轧件变形区沿轧制方向,等效应变速率逐渐增大,后又逐渐减少;在入口端表面附近等效应变速率最大。等效应变速率在表面和心部有明显的差别,由此在轧件表面和心部将导致材料产生不同程度的硬化。

(4) 大变形弹塑性热力耦合有限元方法可以用于模拟分析薄板坯热轧变形过程,从模拟过程可以清楚地掌握轧制过程中轧件的等效应力、应变、应变速率等现场难以测量的分布量。

参考文献

- 1 杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 2 Wertheimer T B. Thermal Mechanically Coupled Analysis in Metal Forming Processes. Swansea, Pineridge Press Ltd., 1982. 425

李传瑞(1971-),男,讲师,硕士研究生,2004 年内蒙古科技大学毕业,从事材料加工工程研究。